

太陽エネルギー学会 第15回セミナー
「宇宙太陽光発電システムの開発動向」

スペースステナから見た 太陽発電衛星システムと衛星構造

2015年12月3日

日本大学・客員教授
JAXA・名誉教授
高野忠

内容

1. はじめに
2. 太陽発電衛星システムの構成
3. スペースステナの問題点
4. 解決策
5. 種々のSPSモデル比べ
6. まとめ

1. はじめに

- 太陽発電衛星は宇宙に浮かんだ発電所。
- 太陽という無限のエネルギー源利用。
- 炭酸ガスや廃棄物の排出ゼロ。
- 地上の太陽光発電と比べ、天候に左右されず、発電時間が長い。
- 地上の電力網と接続される。全体を太陽発電衛星システム(SPSシステム)と呼ぶ。

図1 SPSシステムと電力網の接続

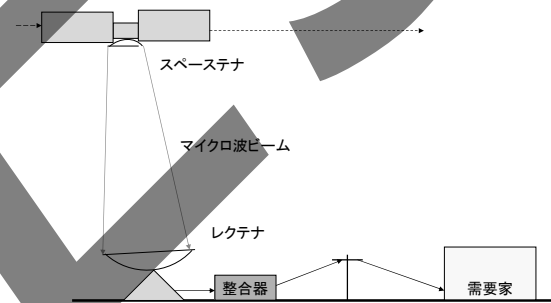


図2 NASAのSPS基準システム (イラストレーション)

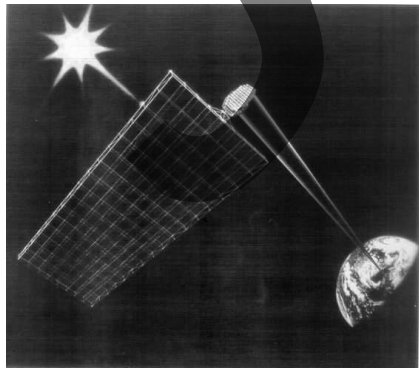


図3 静止軌道(GEO)と低地球軌道(LEO)

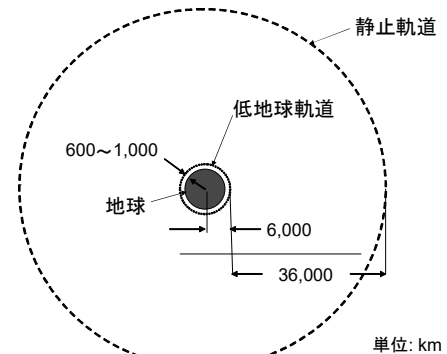


図4 地球上で太陽光発電



図5 太陽から放射され地球に届くエネルギー
(単位面積当たり、単位波長当たり)

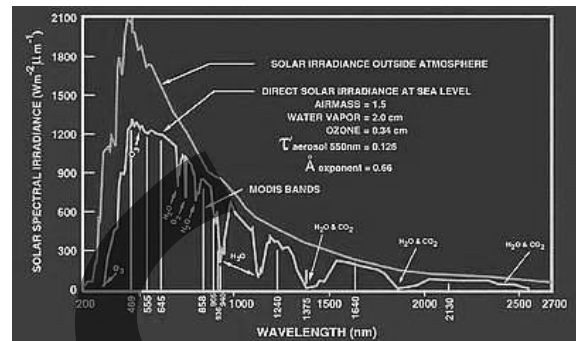
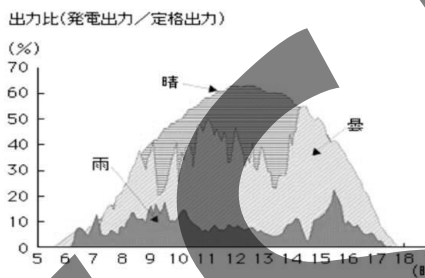
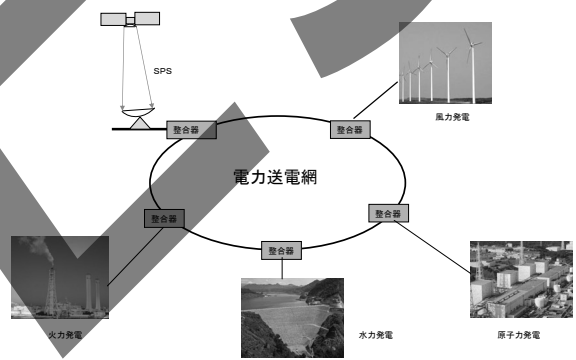


図6 太陽光発電の天候別発電電力量推移



(出所)資源エネルギー庁、「2009年エネルギー白書」

図7 SPSシステムと電力網



2. 太陽発電衛星システムの構成

太陽発電衛星システム(SPSシステム)の構成要素

- 太陽発電衛星(SPS)
- 受電設備(レクテナ)
- 地上電力網との整合器

SPSの構成要素

- 太陽電池
- 直流送電路
- 直流/電波エネルギー変換器(超高周波の電力増幅器)
- アンテナ(スペーステナ)
- 姿勢制御装置
- 通信装置
- 構造

3. スペーステナの問題点

1. ごく細いビームを作ること : 1.2×10^{-5} 度
比較:
はやぶさ追跡64mアンテナ: 3.2×10^{-2} 度。
2. そのビームを、衛星の軌道上位置と姿勢の変化を補正すべく、制御すること <---ビーム幅の1/10は必要。
3. 衛星全体の姿勢制御 <---太陽電池は太陽指向、送電アンテナは地球指向
---以下は、SPS実現の問題点---
4. 整流素子接続 <---素子の故障対策、電源の出力抵抗
5. 打ち上げコスト <---2万トン輸送
6. 半導体技術 <---送電側の電力増幅器、受電側に整流素子

図8 放射ビームと受信アンテナの寸法関係

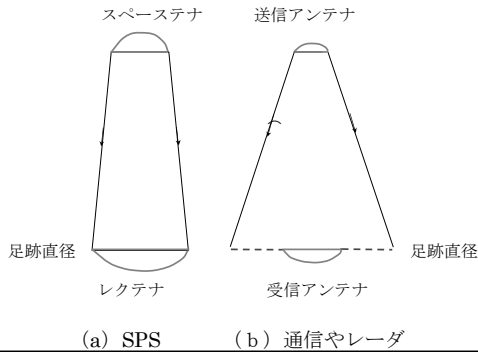


表1 SPS基準システムの各サブシステムおよび対応する既存技術との比較

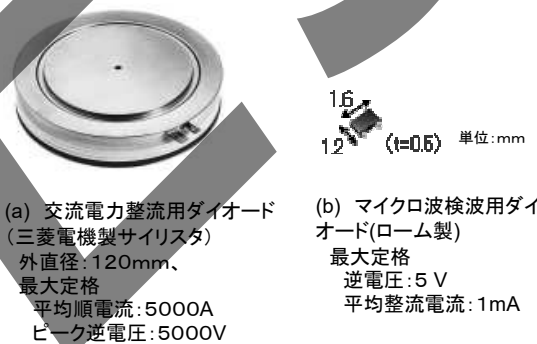
SPSサブシステム		対応する技術		倍率
名称	特性値	名称	特性値	
宇宙構造物	2.1万トン	宇宙基地 (ISS)	108m×74m 419トン	ISSの 50基
太陽電池	850万kW 5km×10km	ソーラーハウス	10kW 5m×10m	ソー ラーハ ウス85 万軒
マイクロ波発生 増幅	500万kW	電子レンジ	1 kW	電子レ ンジ 500万 台

打ち上げコスト

- NASAの規準システム(的500万kW)：重量2.1万トン。
- 打ち上げコストは、現在の値を用いると、下記の値となる。
2.1 x 10¹⁰ g x 1000 円/g = 21兆円
- 日本ではJAXAを中心として、100万kWと小規模なシステム。
打ち上げコストが、現在の1/40なら可能となる。
地上からLEOへ：2.7万トン：6750億円
LEOからGEO：1万トン：500億円
合計：7250億円
- このコスト削減をさらに進め、1/100にしたい。

再使用ロケット
エネルギー回生ゆっくり降下

図9 マイクロ波整流器と似たもの



4. 解決策

ごく細いビームを伴ること

- 巨大な宇宙アンテナを作る。NASA案では、1kmφ、2億素子。
- 比較：
フェルリコ・アレシホ：305mφ、パラボラ反射鏡固定
京大・信楽町：103mφ、移相配列アレ、475素子
- そのための具体的検討が、ほとんどされていない。
- 具体的な解決技術
 - (1) 展開構造
 - (2) 放射素子を平面構造に→ 大量生産アンテナ工学へ
 - (3) 給電回路の簡略化・平板化→ 大量生産アンテナ工学へ
 - (4) 能動素子の削減→ 大量生産アンテナ工学へ
 - (5) 軌道上組み立て

ビーム制御

- 平面波の方向を、位相配列アンテナによって制御することは既知。
- しかしSPSでは、平面波でなく細いビームを扱う。
- 位相配列アンテナによる細いビームの生成法と制御法。

図10 アメリカの基準システムで想定されたアレーアンテナ(半波長ダイポールアンテナの配列)

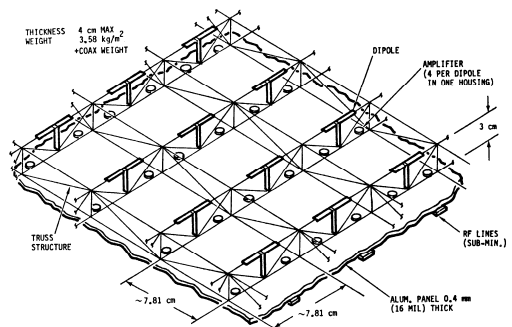
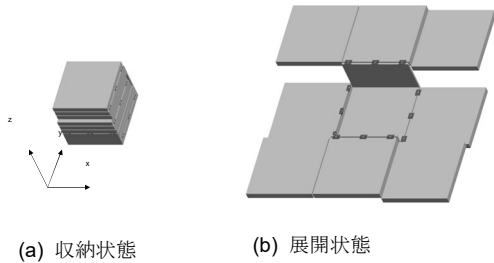


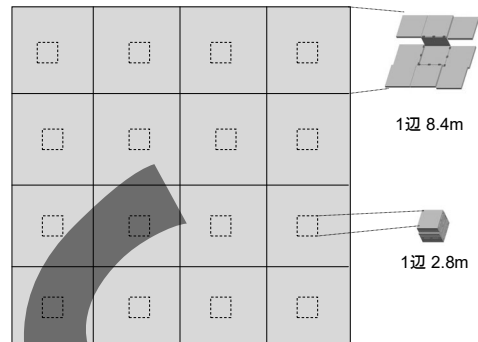
図11 多重折り畳みアレーアンテナ
(パネル間の段差を許容できる)



(a) 収納状態

(b) 展開状態

図12 スペーステナの組み立て法
(34m 開口を8.4m開口で構成する。)



1辺 8.4m

1辺 2.8m

衛星姿勢制御

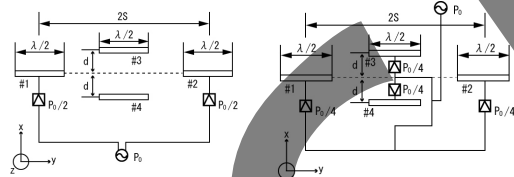
- 太陽電池とアンテナの動きが異なることを、超大電流のジンバルで解決することを検討する。
- 制御しない方向に、逃げない。

打上げコストを削減するため

- 再使用ロケットが不可欠。
- 市場に任せる(宇宙利用で数が増える、特に宇宙旅行)。
- アイデアでは、エネルギー再生ブレーキで、低速降下する。

半導体技術

- 送電側は素子数が多いので、耐電力性は問題ない。NASA規準システムでは、送電アンテナの素子数は2億個なので、10W / 素子としても $2 \times 10^9 \text{ W}$ となる。
- 受電側は、扱い電力を増やす。2.45 GHz, 100W(本講演外)。



(a) 全素子の半分だけ給電する場合

(b) 全素子給電する場合

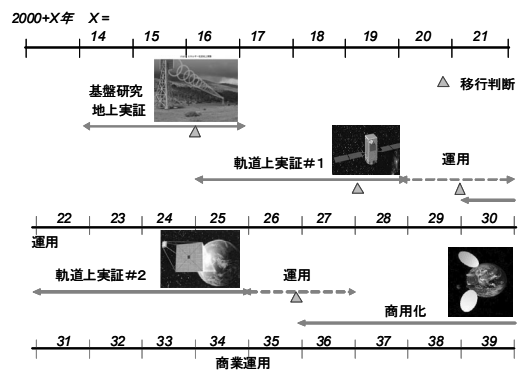
図13 給電素子を半減できる間引き給電法

SPS実現のため線表の重要点

商用化に至るまでを、4段階に分けて段階的に進める。

- (1) 地上実証 : 大電力の生成・整流とアンテナの構成を示す。スペーステナのBBM。
- (2) 軌道上実証#1 : 衛星から細いマイクロ波ビームを、地上レクテナにぴったり納める技術を実証する。小型衛星は、適しない。
- (3) 軌道上実証#2 : 1kW級衛星により、大電力伝送のデモを行なう。電力会社を入れる。
- (4) 商用化 : 1GW(100万kW)級衛星で、商業運用する。電力会社を中心になる。

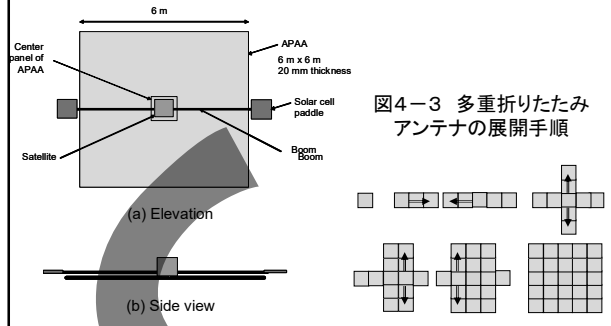
図14 開発線表(案)



つづき

- 1つの線から次の線へ移る際、技術的課題が解決されているか、判断する。
- 次線の段階では、数倍~数10倍の金がかかる。
- 新しい技術が出てくれば、それも使う。
- 解決されていなければ、次には移らない。その場合、前の線で開発された技術に対し、別な応用も考える。
- このようにすれば初期段階で、許容できない程大きな予算を、要求する必要がない。
- 地上実証試験と軌道上実証試験#1は、宇宙機関主体。
- 軌道上実証試験#2と商用化は、電力会社が主体。

図15 軌道上実証#1用衛星
(イプシロンロケット搭載を想定)



5. 種々のSPSモデル比べ

これまで日米で、種々のモデルが提案されてきた。

- 米NASA標準モデル
- SPS2000モデル
- NEDOぐる巻モデル
- 米 Fresh Look Study
- JAXA Advanced Model
- USEF テザ・モデル
- これらをシステム構成などの特徴で比べてみる。

表2 種々のSPSモデルの比較

モデル名	米NASA標準モデル	SPS2000モデル	NEDOぐる巻モデル	米 Fresh Look Study	JAXA Advan. Model	USEF テザモデル
発表年	1980	1990	1994	1997	2004	2006
特長	GEOシステム検討	LEOシステム検討	GEOアイデアのみ	太陽同期軌道(1000km)アイデアのみ	GEOアイデアのみ	GEO SOと増幅器を表裏アイデアのみ
姿勢制御	完全制御	姿勢制御しない(重力傾斜安定)	完全制御	重力傾斜アンテナ個別SCP回転指向	完全制御	姿勢制御しない(重力傾斜安定)
構造図	図1	図2	図3	図4	図5	図6

6. まとめ

- 太陽発電衛星システムは、地上の太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー発電に比し、安定性で有利。火力発電や原子力発電に対し、炭酸ガス排出、廃棄物や資源枯渇の問題無く有利である。
- コストも十分下げられる(打上げコストが、将来下がる見込み)。
- 技術的には、実証すべき要素があるが、十分解決可能である。
- 宇宙技術を横目で見つつ、電力系会社が実用化への開発を進めることが肝要。それが優位性を確保することになる。